(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

УДК: 622.271:528.8 10.70769/3030-3214.SRT.3.3.2025.30

МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ВЫЗВАННЫХ ПОДЗЕМНЫМИ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ХОНДИЗА, НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ INSAR И СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ SENTINEL-1

Ботиров Шохбос Соибович
Старший преподаватель, Термезский государственный инженерный и агротехнологический университет, Термез, Узбекистан
E-mail: shoxbos.b@mail.ru
ORCID ID: 0009-0002-3045-4217

Номдоров Рустам Уралович
PhD, доцент, Каршинский государственный технический университет, Карши, Узбекистан
E-mail: rustamnomdorov@mail.ru
ORCID ID: 0009-0000-6987-8995

Аннотация. *Подземные горные разработки могут вызывать оседание земной поверхности (субсиденцию). Интерферометрическая радиолокация с синтезированной апертурой (InSAR) стала экономичным, эффективным и высокоточным методом для изучения и мониторинга деформаций земной поверхности. Однако в районах горных работ для успешного применения технологии InSAR необходимо преодолеть ряд факторов, таких как временная декорреляция (то есть снижение согласованности изображений с течением времени) и определяемый градиент деформации, которые ограничивают способность InSAR отслеживать быстрые процессы оседания. В настоящей статье рассматривается применение спутниковых изображений Sentinel-1 с периодом повторного съёма 6 или 12 дней, что позволяет повысить чувствительность к градиенту деформации и снизить влияние временной декорреляции. Путём комбинирования методов Small Baseline Subsets (SBAS) и Interferometric Point Target Analysis (IPTA) были получены пространственно непрерывные результаты оседания земной поверхности на примере месторождения Хондиза, расположенного в Сурхандарьинской области. Согласно результатам, в данном районе зафиксировано оседание до 70 см в год, что чётко отражает деформационное поле и его динамику развития. Полученные данные свидетельствуют о том, что технология InSAR является эффективным инструментом для мониторинга оседания земной поверхности в районах горных работ и предоставляет ценные сведения, необходимые для последующих мероприятий по восстановлению окружающей среды.*

Ключевые слова: *InSAR, оседание земной поверхности, подземные горные работы, Sentinel-1, IPTA, SBAS, интерферометрия, деформации, мониторинг, Сурхандарьинская область, месторождение Хондиза, спутниковые данные.*

XONDIZA KONIDA YER OSTI KON ISHLARI NATIJASIDA YUZAGA KELGAN YER YUZASI DEFORMATSIYALARINI INSAR TEXNOLOGIYASI VA SENTINEL-1 SUN’IY YO‘LDOSH TASVIRLARI ASOSIDA MONITORING QILISH

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

Botirov Shoxbos Soibjon o'g'li
Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti katta o'qituvchisi, Termiz, O'zbekiston

Nomdorov Rustam Uralovich
Qarshi davlat texnika universiteti, PhD, dotsent, Qarshi, O'zbekiston

Annotatsiya. *Yer osti kon ishlari yer yuzasining cho'kishini (subsidentsiyani) keltirib chiqarishi mumkin. Sintetik aperturali radar interferometriyasi (InSAR) yer yuzasi deformatsiyalarini o'rganish va monitoring qilish uchun iqtisodiy, samarali hamda yuqori aniqlikka ega usullardan biriga aylandi. Biroq kon qazish ishlari olib boriladigan hududlarda InSAR texnologiyasini muvaffaqiyatli qo'llash uchun vaqt bo'yicha dekorrelyatsiya (ya'ni, vaqt o'tishi bilan tasvirlar o'zaro mosligining pasayishi) va aniqlanishi mumkin bo'lgan deformatsiya gradiyenti kabi qator omillarni yengib o'tish zarur. Bu omillar InSAR'ning tezkor cho'kish jarayonlarini kuzatish imkoniyatlarini cheklaydi. Ushbu maqolada Sentinel-1 sun'iy yo'ldoshi tasvirlaridan foydalanish tajribasi yoritilgan. Tasvirlar 6 yoki 12 kunlik takroriy suratga olish davri bilan olinib, bu deformatsiya gradiyentiga sezgirlikni oshirish va vaqt bo'yicha dekorrelyatsiya ta'sirini kamaytirish imkonini beradi. Small Baseline Subsets (SBAS) va Interferometric Point Target Analysis (IPTA) usullarini birlashtirish orqali Surxondaryo viloyatida joylashgan Xondiza koni misolida yer yuzasi cho'kishini uzluksiz fazoviy natijalar ko'rinishida olishga erishildi. Natijalarga ko'ra, mazkur hududda yiliga 70 sm gacha cho'kish kuzatilgan bo'lib, bu deformatsiya maydoni va uning rivojlanish dinamikasini aniq ifodalaydi. Olingan ma'lumotlar shuni ko'rsatadiki, InSAR texnologiyasi konchilik hududlarida yer yuzasi cho'kishini monitoring qilish uchun samarali vosita bo'lib, atrof-muhitni tiklash bo'yicha keyingi chora-tadbirlarni belgilashda zarur bo'lgan muhim ma'lumotlarni taqdim etadi.*
Kalit so'zlar: *InSAR, yer yuzasi cho'kishi, yer osti kon ishlari, Sentinel-1, IPTA, SBAS, interferometriya, deformatsiyalar, monitoring, Surxondaryo viloyati, Xondiza koni, sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari.*

MONITORING OF LAND SURFACE DEFORMATIONS INDUCED BY UNDERGROUND MINING AT THE KHONDIZA DEPOSIT USING INSAR TECHNOLOGY AND SENTINEL-1 SATELLITE IMAGERY

Botirov Shokhbos Soibjon ugli
Senior Lecturer of the Termez State University of Engineering and Agrotechnologies, Termez, Uzbekistan

Nomdorov Rustam Uralovich
Karshi State Technical University, PhD, Docent, Karshi, Uzbekistan

Abstract. *Underground mining operations can cause land surface subsidence. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) has become an economical, effective, and highly accurate method for studying and monitoring surface deformations. However, in mining areas, the successful application of InSAR technology requires overcoming several challenges, such as temporal decorrelation (i.e., the reduction in image coherence over time) and the limitations related to detectable deformation gradients, which constrain InSAR's ability to track rapid subsidence processes. This study explores the use of Sentinel-1 satellite imagery with a revisit time of 6 or 12 days, which improves sensitivity to deformation gradients and reduces the impact of temporal decorrelation. By combining the Small Baseline Subsets (SBAS) and Interferometric Point Target Analysis (IPTA) methods, spatially continuous results of land subsidence were obtained using the example of the Khondiza mining site, located in the Surkhandarya region. The results revealed subsidence rates of up to 70 cm per year in this area, clearly illustrating the deformation field and its dynamic development. The findings demonstrate that InSAR technology is an effective tool for monitoring land subsidence in mining regions and provides valuable data for planning subsequent environmental restoration measures.*
Keywords: *InSAR, land subsidence, underground mining, Sentinel-1, IPTA, SBAS, interferometry, deformation, monitoring, Surkhandarya region, Khondiza deposit, satellite data.*

Введение. Оседание земной поверхности представляет собой одну из основных угроз, подрывающих комфортность проживания и устойчивое экономическое развитие. Особенно

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

остро эта проблема проявляется в районах подземной добычи полезных ископаемых. Полиметаллическое месторождение Хондиза, расположенное в Сарыасийском районе Сурхандарьинской области, разрабатывается подземным способом. Добыча осуществляется поэтажно, и из недр месторождения извлекается около десяти видов металлов. Основными добываемыми ресурсами являются: золото, медь, серебро, свинец и другие.

Деформации поверхности земли, возникающие в результате подземных горных работ на полиметаллических месторождениях, как правило, характеризуются высокой скоростью и неопределённостью, поскольку они напрямую зависят от сложной динамики добычных процессов. InSAR (интерферометрическая радиолокация с синтезированной апертурой) является эффективным методом мониторинга деформаций земной поверхности и используется для наблюдения и анализа различных типов деформационных процессов.

Одним из ключевых условий для проведения интерферометрии является то, что максимальный градиент деформации не должен превышать одну фазовую линию на пиксель. Этот параметр зависит от отношения длины волны радиолокационного сигнала к размеру пикселя (Graham, 1974). Максимальный градиент деформации (d_x) рассчитывается по следующей формуле:

$$d_x = \frac{\lambda}{2\eta}. \quad (1)$$

Как показано в исследованиях Zhang и соавт. (2012), из-за высокой скорости деформаций и резких изменений растительного покрова на территории добычи, интерферометрические пары с высоким временным согласованием оптимально формируются в зимний период. Максимально допустимый градиент деформации, который может быть зарегистрирован с помощью технологии InSAR, зависит от длины волны радара, пространственного разрешения SAR-изображений и периода повторного визита спутника. Использование длинноволновых радаров с высокой пространственно-временной разрешающей способностью позволяет повысить чувствительность к максимальным градиентам деформации между пикселями.

Для эффективного мониторинга деформаций земной поверхности в районе месторождения применены изображения спутников Sentinel-1. Спутники Sentinel-1A и Sentinel-1B, обладающие периодом повторного визита 6 и 12 дней соответственно, позволяют повысить чувствительность к деформационным градиентам и минимизировать эффект временной декорреляции. Согласно формуле (1), для интерферограммы с пиксельным разрешением 20 м × 20 м, формируемой спутниками Sentinel-1A/B, максимальный обнаруживаемый градиент деформации составляет 1,4 см. По сравнению со спутниками ERS или ENVISAT (с периодом повторного визита 35 дней) и RADARSAT (24 дня), интервал 6–12 дней у Sentinel-1 обеспечивает в четыре раза более высокую способность обнаружения деформаций.

Материалы и методы исследования. Радиолокационные спутники с синтезированной апертурой (SAR) формируют изображения земной поверхности на основе двух компонентов: фазы и интенсивности (яркости) отражённого сигнала. Интерферометрическая фазовая разность, получаемая в результате сопряжённого произведения двух радиолокационных изображений, отражает смещения, произошедшие вдоль направления линии визирования (LOS — line of sight) между моментами съёмки. Интерферометрическая фаза выражается следующим образом:

$$\varphi_{int} = \varphi_{top} + \varphi_{flat} + \varphi_{def} + \delta\varphi_{atm} + \delta\varphi_n \quad (2)$$

где: φ_{top} — фазовая составляющая, обусловленная рельефом местности, φ_{flat} — фаза, соответствующая идеальной плоской поверхности, φ_{def} — фаза, вызванная деформацией земной поверхности по направлению LOS, $\delta\varphi_{atm}$ — фазовая погрешность, вызванная атмосферными условиями, $\delta\varphi_n$ — фазовая погрешность, вызванная шумами.

После устранения влияния рельефа, атмосферных и геометрических факторов на основе внешней цифровой модели рельефа, атмосферных данных и геометрии съёмки, смещение по линии визирования (ΔR) может быть вычислено по следующей формуле:

$$\varphi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda} \times \Delta R. \quad (3)$$

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

На полученную дифференциальную интерферограмму могут оказывать влияние различные факторы, включая атмосферные возмущения, пространственную и временную декорреляцию. Для минимизации этих ограничений применяются два основных метода: SBAS (Small Baseline Subsets) и анализ когерентных отражателей (IPTA) (Werner и др., 2003; Ferretti и др., 2001).

Метод SBAS представляет собой практический подход, направленный на снижение эффекта пространственной декорреляции путём использования ограниченного набора SAR-изображений с малыми орбитальными различиями. Метод IPTA (Interferometric Point Target Analysis), разработанный компанией GAMMA Remote Sensing, основан на анализе когерентных точечных целей.

В настоящем исследовании методы SBAS и IPTA использовались совместно для получения временных рядов деформаций на территории месторождения Хондиза.

Результаты и обсуждение. В настоящем исследовании для анализа деформаций земной поверхности использовались данные в режиме IW (Interferometric Wide Swath) спутниковой миссии Sentinel-1, а также внешняя информация о рельефе на основе цифровой модели высот SRTM (DEM). Оседание земной поверхности в период с апреля 2017 года по ноябрь 2018 года было рассчитано с использованием технологии IPTA (Interferometric Point Target Analysis) на основе 48 спутниковых изображений.

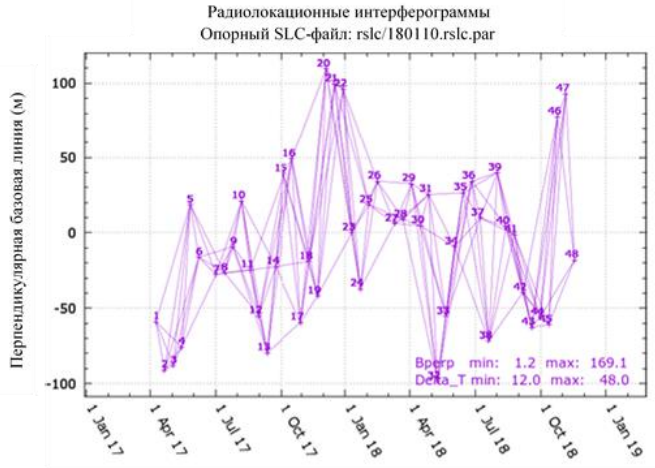

Рис.1. График базовых линий, использованных для формирования интерферометрических пар.

Из этих 48 изображений было сформировано 170 интерферограмм, при этом отбирались пары сцен с временной базой менее 48 суток и пространственной базой менее 200 метров (график базовых линий приведён на Рисунке 1).

Для участков с малыми деформациями (в данном случае — 5000 × 1000 пикселей; после мультиспекл-преобразования (multilook) с коэффициентом 5 × 1 — 1000 × 1000 пикселей) был понижен порог выбора когерентных точек с целью получения плотного облака целевых отражателей. В результате для анализа IPTA было отобрано 1 399 909 кандидатов когерентных точек.

Рис.2. График временных рядов деформации в районе месторождения Хондиза.

С использованием программного обеспечения GAMMA IPTA была построена карта скорости оседания, а также графики временных рядов деформации по каждому отражателю. Эти графики чётко отображают текущее состояние деформации земной поверхности в исследуемом районе и направление её развития в зависимости от интенсивности горных работ. Даже в зонах с максимальным оседанием технология показала

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

высокую точность: на некоторых точках было зафиксировано оседание более 1 метра. При этом в более ранних подходах (например, в методах, основанных на временной декорреляции) можно было определить лишь зону деформации, но не количественные параметры (Zhang и др., 2012).

По сравнению с данными SAR спутников ENVISAT и RADARSAT, 12-дневное временное разрешение изображений Sentinel-1 в режиме IW существенно повышает способность детектировать градиенты деформации в горнодобывающих зонах. Данная технология не только точно определяет площадь деформации, но и позволяет количественно охарактеризовать её масштаб и динамику развития.

(Нижние серые изображения представляют собой радиолокационные снимки Sentinel-1; наложенные цветные кольца отображают скорость деформации. Каждый цветовой цикл соответствует оседанию на 20 см.)

Во втором рисунке приведена временная последовательность деформаций на территории месторождения Хондиза, полученная на основе анализа 48 спутниковых изображений:

Рисунок 2. В правом нижнем углу, начиная с седьмого изображения, дополнительно выявлены ещё три центра оседания;

Рисунок 3. График деформации по времени для точки с наибольшей скоростью оседания (ID: 349 097, пиксельные координаты: x = 2249, y = 331). Скорость оседания в данной точке составляет 70 см в год;

Рисунок 4. Скорость деформации на территории месторождения Хондиза (апрель 2023 г. – ноябрь 2024 г.). Максимальная скорость оседания достигает 70 см в год; зона деформации чётко определяется и характеризуется пространственной непрерывностью.

Заключение. В настоящем исследовании для выявления оседания земной поверхности, вызванного подземными горными работами, была применена технология InSAR на основе данных SAR спутников Sentinel-1 с использованием комбинированного подхода SBAS и IPTA. Полученные результаты показали, что подземная добыча полезных ископаемых приводит к интенсивным деформациям земной поверхности со скоростью до 70 см в год.

Для каждой когерентной точки возможно построение графика, накопленного (кумулятивного) оседания во времени на момент каждого спутникового съёма (см., например, Рисунок 3).

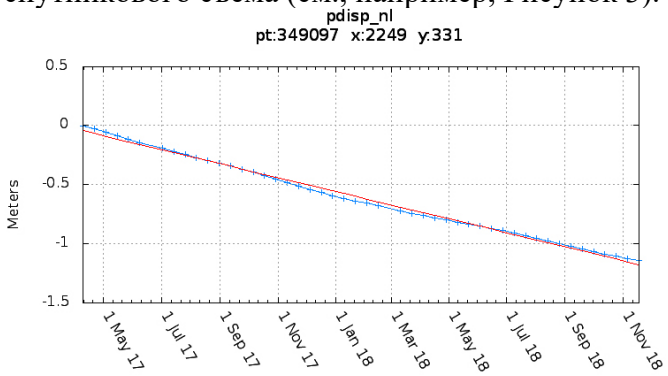

Рис.3. График временной последовательности смещений в центре оседания на территории месторождения Хондиза.

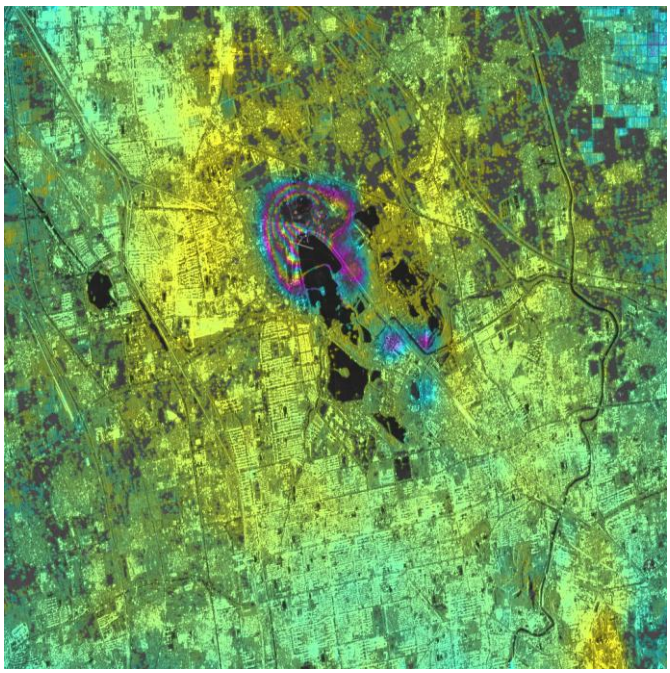

Рис.4. Скорость деформации на территории месторождения Хондиза.

(Нижнее серое изображение — радиолокационный снимок Sentinel-1; наложенные цветные кольца отображают скорость деформации. Каждый цветовой цикл соответствует 10 см деформации в год.).

Данная технология представляет собой эффективный инструмент для мониторинга оседания земной поверхности в горнодо-

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

бывающих районах и предоставляет ключевую информацию для планирования мероприятий по восстановлению окружающей среды.

Благодаря короткому интервалу повторного визита, спутниковые данные Sentinel-1 являются более эффективными для выявления быстрых деформаций в горнодобывающих районах по сравнению с другими SAR-спутниками со средним пространственным разрешением. С развитием радиолокационных спутниковых технологий, метод InSAR всё шире используется как эффективный и экономичный инструмент для мониторинга как быстрых, так и медленных деформационных процессов — от землетрясений, вулканической активности и оползней до просадок в шахтных районах и инженерных деформаций.

Если объединить данные о просадках с заранее построенными моделями деформаций, а также интегрировать их с наземными методами, такими как геометрическое нивелирование, GPS-наблюдения или послойное маркирование, можно сформировать «космическо-наземную» трёхмерную систему мониторинга. Такой подход превращает технологию InSAR в надёжный и информативный метод наблюдения за оседанием земной поверхности в зонах добычи, предоставляющий ключевые данные, необходимые для восстановления и реабилитации окружающей среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. Новый алгоритм мониторинга деформаций земной поверхности на основе дифференциальных SAR-интерферограмм с малыми базовыми линиями // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2002. — Т. 40. — С. 2375–2383.
2. Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. Постоянные отражатели (Permanent Scatterers) в SAR-интерферометрии // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2001. — Т. 39. — С. 8–20.
3. Graham, L. C. Синтетическая интерферометрическая радиолокация для топографического картографирования // Proceedings of the IEEE. — 1974. — Т. 62. — С. 763–768.
4. Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T., Wiesmann, A. Интерферометрический анализ точечных целей (IPTA) для построения карт деформаций // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2003. — Т. 7. — С. 4362–4364.
5. Zhang, X. D., Ge, D. Q., Wu, L. X., Zhang, L., Wang, Y., Guo, X. F. Исследование мониторинга оседания в шахтных городах с использованием InSAR с малыми базами и когерентными отражателями // Журнал Китайского угольного общества (Journal of China Coal Society). — 2012. — Т. 37. — С. 1606–1611.